

Sequías agrícolas: recurrencia, clasificación y distribución en la Región Pampeana argentina

OLGA EUGENIA SCARPATI¹ ✉ | ALBERTO DANIEL CAPRIOLO²

Recibido: 24/08/2015 | Aceptado: 12/03/2016

Resumen

Las sequías, fenómeno de alta frecuencia en la Región Pampeana (Argentina), se estudian a través de un índice agrometeorológico derivado del balance de agua del suelo, con lo que se presenta un aporte diferente a la bibliografía del tema. Se considera como índice de los eventos, el valor anual del déficit de agua en el suelo. Ellos tienen lugar casi todos los años, si no en la totalidad del territorio, en algún área y espacio temporal. Las consiguientes consecuencias son diversas en su gravedad, pero siempre tienen impactos socioeconómicos. La evolución y distribución de los sucesos acaecidos se analizan y se realiza la correspondiente climatología.

En el estudio se han utilizado datos diarios de precipitación del Servicio Meteorológico Nacional del período 1950 – 2010; evapotranspiración potencial media diaria según la fórmula de Penman-Monteith; balance de agua en el suelo considerando las características del suelo obtenidas «in situ»; y la aplicación de los tests estadísticos no paramétricos Mann-Kendall y Sen. Las series anuales del índice agrometeorológico se emplean para clasificar de la severidad de los eventos en leves, moderados, severos y fuertes y se estudia la tendencia para cada localidad y diferentes lapsos de tiempo.

Las sequías presentan tendencias decrecientes durante los períodos de sesenta y un años (1950 - 2010) y de cincuenta años (1961 – 2010) en casi todas las estaciones analizadas.

Palabras clave: sequía agrícola, balance de agua, pampa argentina, Región Pampeana, Makesens, variabilidad climática, distribución temporal

Abstract

Droughts: recurrence, classification and distribution in the Argentina Pampas

Droughts, phenomenon of high frequency in Pampean Region (Argentina) are studied by means of an agroclimatic index derived from soil water balance, so a different contribution is presented to the subject bibliography. The annual value of soil water deficit is considered as index of the events. They take place almost every year, if not in the whole territory, in some area and temporal space. The resulting consequences are varied in severity, but always have socioeconomic impacts. The evolution and distribution of the events are analyzed and the corresponding climatology is done.

¹. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación (FaHCE). Universidad Nacional de La Plata (UNLP), oescarpati@gmail.com

². Centro de Estudios Farmacológicos y Botánicos (CEFYBO-CONICET), albertocapriolo@yahoo.com.ar

There were used daily precipitation data from the National Meteorological Service for the period 1950 - 2010, mean daily potential evapotranspiration according Penman-Monteith formula, soil water balance considering soil characteristics obtained «in situ» and with the application of Mann-Kendall and Sen non parametric tests. The data series of agroclimatic index values are employed to classified the events severity in mild, moderate, severe and extreme and the trend for each station and different period of time are studied. The annual soil water deficit values are employed as index of the severity classification. The quantity of mild, moderate, severe and extreme events are obtained and the trend for different time periods. Decreasing trends are obtained for the periods 1950 - 2010 and 1961 - 2010. Droughts present decreasing trend for the period of sixty one years (1950 - 2010) and fifty years (1961 - 2010) in almost analyzed stations

Keywords: agricultural drought, water balance, argentine pampa, Pampean Region, Makesens, climatic variability, temporal distribution

Abstrait

Sécheresses: récidence, la classification et la distribution dans la pampa Argentine

La sécheresse, un phénomène de haute fréquence dans la région Pampéenne (Argentine), est étudiée en utilisant un indice agroclimatique dérivé de l'équilibre hydrique du sol. Ainsi, nous présentons une contribution nouvelle à la bibliographie sur le sujet. La valeur annuelle du déficit hydrique du sol est considérée comme un indice des événements. Lesdits ont eu lieu presque chaque année, sinon dans l'ensemble du territoire, au moins dans quelques régions et dans quelque moment dans le temps. Les conséquences ont été variées en gravité, mais elles ont toujours eu des impacts socio-économiques.

L'évolution et la distribution des événements sont analysées et la climatologie correspondante est faite.

Dans notre étude, nous avons utilisé les données quotidiennes des précipitations du Service Météorologique National pour la période 1950 à 2010 ; la moyenne d'évapotranspiration potentielle quotidienne, selon la formule de Penman-Monteith ; l'équilibre hydrique du sol en tenant compte des caractéristiques du sol obtenus *in situ* ; et les tests non paramétriques de Mann-Kendall et de Sen.

Les séries de valeur de l'index agroclimatique sont utilisées pour classer la gravité des événements en légère, modérée, sévère et extrême. Différents périodes de temps et la tendance dans chaque localité ont été analysés. Nous avons constaté des tendances à la baisse pour une période de soixante et un ans (1950-2010) et cinquante ans (1961-2010) dans presque toutes les stations analysées.

Mots-clés: sécheresse agricole, bilan hydrique, pampa argentine, pampéenne Région, Makesens, variabilité climatique, la distribution temporelle

1. Introducción

1.1. Antecedentes sobre el recurso agua y la región

El agua está relacionada con todos los componentes del sistema climático (atmósfera, hidrósfera, superficie terrestre y biosfera) y por lo tanto cualquier cambio en él significa un impacto en

el recurso agua. El recurso se encuentra en permanente movimiento, siguiendo las etapas de su propio ciclo, el cual está estrechamente vinculado a los cambios de la temperatura del aire y al balance de la radiación del sistema tierra- atmósfera. Todos los componentes del ciclo del agua presentan una variabilidad natural en escalas de tiempo interanuales a decenales que enmascara frecuentemente las tendencias al largo plazo.

La disponibilidad de agua se reduce cada vez más en la Tierra y su manejo inadecuado ha puesto en peligro su categoría de renovable. Las problemáticas en torno al agua son diversas y alertan sobre la necesidad de optimizar la racionalidad de su manejo. La reducción de la disponibilidad del recurso en calidad o en cantidad provoca conflictos de diferente naturaleza, que es necesario conocer y entender para, luego, poder resolverlo (Panel Intergubernamental para el Cambio Climático, IPCC, 2011).

Existe actualmente una creciente preocupación mundial por alcanzar una agricultura sostenible. Ello se debe a distintas causas: a) los recursos de tierras arables son finitos; b) los problemas crecientes y generalizados de la degradación de los suelos; c) la necesidad de preservar el recurso suelo para su utilización a largo plazo; d) los efectos por el cambio climático; y e) el crecimiento de la población de los países en desarrollo (Casas, 2001).

Desde 1960, las tierras de cultivo han aumentado en un 83% en América del Sur, un 46% en África y un 36% en Asia, coincidiendo con una importante deforestación en las tres regiones. En Sudamérica, la superficie utilizada para la agricultura registró un aumento del 18% durante el período 1970 - 2009, mientras que la producción pecuaria aumentó en un 31% (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, PNUMA, 2012).

La adopción de técnicas de labranza, de conservación y de uso de plaguicidas menos agresivos causó, respectivamente, una disminución en la erosión del suelo y en el riesgo de contaminación en Argentina a lo largo del período 1956 - 2005. Además, el riesgo de erosión hídrica y eólica disminuyó considerablemente en las dos últimas décadas en respuesta a la expansión de la agricultura con labranza cero (Viglizzo *et al.*, 2011).

La Región Pampeana comprende la totalidad de la provincia de Buenos Aires, sur de la de Santa Fe, sur de la de Entre Ríos, sur de la de Córdoba y este de la de La Pampa. En ella las sequías se producen cuando las condiciones atmosféricas no permiten la formación de lluvias. El análisis de la distribución de la precipitación anual en la región, manifiesta la importancia que tiene la circulación general de la atmósfera. Las precipitaciones máximas ocurren en la proximidad de la costa, ello significa en gran aporte de humedad del aire atlántico, que al ingresar al territorio precipita como consecuencia de la actividad de las masas de aire más frías que, desde el suroeste y el sur, se oponen a su desplazamiento. Esta misma característica de las lluvias, que coincide con la dirección más frecuente de los frentes que se desplazan, revela el origen frontal del mayor volumen de lluvia. A pesar de ello, y especialmente en verano, pueden ocurrir precipitaciones originadas por inestabilidad convectiva de masas de aire no perturbadas por la actividad frontal.

Cuando se establece un centro de alta presión sobre la Región Pampeana y permanece un tiempo estacionado sobre el territorio no permite la formación del frente. Otras veces, el anticiclón del Océano Atlántico se desplaza hacia el norte y no trae aire húmedo sobre la región.

El área en estudio se halla entre los índices climáticos de Thornthwaite $IH = -20$, $IH = 0$ y una zona al este que alcanza a $IH = 20$ o sea es una región predominantemente húmeda (Quintela *et*

al., 1989 a y 1989 b, Forte Lay *et al.*, 1992 y Scian y Donnari, 1997). La Región Pampeana húmeda tiene precipitación media anual superior al rango 1.000 - 700 mm y la región subhúmeda 700 - 400 mm.

Es una de las regiones argentinas más importantes en lo que se refiere a producción agropecuaria. La mayoría de las actividades agrícolas se desarrollan en condiciones de secano. Por ello, la producción depende de la precipitación caída durante el ciclo de cultivo y es afectada por la variabilidad climática. Si bien, las condiciones económicas no siempre han estimulado la producción agrícola, los productores agropecuarios tratan continuamente de mejorar sus rendimientos intensificando sus sistemas de producción con adopción de modernas técnicas, aún cuando éstas son más sensibles a la variabilidad climática.

La contribución en el desarrollo tecnológico de los productores agropecuarios, los científicos y los técnicos es muy significativa. En este sentido, se considera que la conservación de los recursos constituye el basamento de la pirámide de los sistemas, ya que cuando uno de ellos se degrada intensamente por distintos procesos, la pérdida de su productividad y/o cantidad, puede ser irreversible o su recuperación tornarse económicamente inviable.

La ocurrencia de sequías afecta tanto a regiones húmedas como áridas y semi-áridas, y la necesidad de mitigar sus impactos es igualmente importante en todas ellas. Esto llevó al desarrollo de obras de infraestructura para el almacenaje y transporte de agua para los períodos de escasez en las precipitaciones, como son los embalses y los canales de riego. Sin embargo, muchas veces estas obras son insuficientes, principalmente cuando no se pueden establecer con un cierto tiempo de anticipación las condiciones del clima.

Viglizzo (1994) nos comenta la evolución de las actividades agropecuarias en la región. El período que abarca desde 1880 hasta 1940 se evalúa como un período de «descarga ecológica», caracterizado por el sobreuso y mal uso de los suelos y el ambiente productivo en la Región Pampeana. En la primera etapa, el elevado contenido de materia orgánica de los suelos vírgenes y una agricultura que no había llegado a su etapa de expansión, permitieron mantener los suelos productivos, con procesos degradatorios incipientes o localizados. En el siglo XX, las sequías periódicas, la gran expansión de la agricultura ocurrida a principios del siglo y el deterioro sufrido por los suelos por las labranzas excesivas con arado de reja y vertedera, intensificaron los procesos de degradación de la Región Pampeana, con un marcado descenso de los contenidos de materia orgánica e incremento de los procesos de erosión hídrica y eólica. Se debe recordar que la presencia de materia orgánica en la composición de los suelos ayuda a su estructura y a favorecer el almacenaje de agua.

Ya en la década de 1940 se reconoce a la región como afectada por erosión y sequía, y se expresa que existen factores naturales predisponentes, tales como la estructura inestable de los suelos arenosos y las sequías periódicas que la afectan. Entre las causas antrópicas, señalan al desmonte y la roturación de praderas nativas, el laboreo del suelo sin humedad, el monocultivo, el pastoreo excesivo, la explotación inadecuada del suelo sin tener en cuenta la aptitud de las tierras, la colonización inadecuada y por último, la indiferencia social a los procesos de degradación de los suelos.

Paulatinamente, se logró estabilizar el ciclo de deterioro y erosión de los suelos. La sustitución creciente de cultivos de cosecha por alfalfa, la mayor superficie destinada a la ganadería, el mejor uso de los residuos de cosecha, los planes masivos de forestación, unido a la acción de experi-

mentación y asesoramiento técnica y científica, permitió generar un período de «reacción» que conformó el ciclo de recarga ecológica que se produjo a partir de 1950.

Se puede recordar que en el norte de la provincia de Buenos Aires, empezó a expandirse la ganadería desde 1940 como consecuencia de privilegiarse la exportación de carne de mayor valor por volumen exportado, con relación al maíz y otros cereales de gran volumen y comparativamente bajo valor. Esta tendencia se mantuvo hasta aproximadamente fines de la década de 1960.

Este período de «recarga ecológica» se caracterizó por la vigencia de un modelo mixto de explotación de la tierra. En el mismo, la alfalfa y la ganadería restituían la materia orgánica del suelo y le devolvían el nitrógeno exportado con los granos, además de restituir las condiciones físicas del suelo y la conservación y almacenaje de agua en el suelo. Luego de 5 a 6 años de pastura, se volvía a hacer agricultura con muy buenos rendimientos. La ganadería era casi tan rentable como la agricultura, y los precios relativos del trigo y de la carne, determinaban cuanta superficie se dedicaba a una u otra actividad. Inconscientemente, este sistema adoptado por razones económicas y sociales, resultó ser una solución conservacionista y sustentable.

Entre las décadas de 1950 y 1960 se inició un proceso de recuperación del ambiente productivo a partir de acciones públicas y privadas y la introducción de tecnologías conservacionistas. Diferentes instituciones técnicas, docentes y científicas, junto con legislación conservacionista aplicada por algunos gobiernos provinciales, contribuyeron significativamente a consolidar este ciclo regenerativo de las propiedades edáficas.

Casas (2001) señala que a partir de 1970 los suelos de la Región Pampeana sufrieron una extraordinaria transformación de la actividad agrícola, caracterizada por el gran aumento de la producción, adopción de moderna tecnología, desarrollo de nuevas formas organizativas de la producción y un acelerado proceso de agriculturización que solamente en dicha región, desplazó alrededor de 5 millones de hectáreas de uso ganadero a la agricultura. Desde comienzos de esa década se inició este proceso de agriculturización en coincidencia con la expansión del cultivo de soja, que impacta negativamente sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos y también sobre su integridad, cuando no se cuenta con asesoramiento técnico. Este proceso creció en el área maicera a una tasa anual del 4 %. El aspecto más grave de la expansión e intensificación de la agricultura fue el incremento de la erosión hídrica de los suelos, dado su carácter irreversible.

Las principales causas del deterioro progresivo de los suelos en este período fueron mencionadas ya por Casas (1998):

- El empleo de tractores más potentes y equipos de mayor ancho de labor y más pesados permitieron la intensificación de las labranzas, ocasionando el desmejoramiento de la estructura y la compactación del suelo.
- Reemplazo de cultivos tradicionales como el maíz, por otros de mayor atractivo económico como la soja. Ello trajo como consecuencia una menor incorporación de residuos post-cosecha y por otro lado la posibilidad de combinar el ciclo del cultivo de soja con el del trigo para obtener dos cosechas en un año. A su vez, esto implica una alta tasa de extracción de nutrientes y agua del suelo.
- Un ciclo húmedo que abarcó principalmente el período 1971/85 muestra una tendencia al aumento de las precipitaciones en todo el núcleo maicero y otras zonas de la Región Pampeana. En este período, Forte *et al.* (2008) señalaron que se registraron excesos hídricos directamente

relacionados con la exitosa penetración del doble cultivo trigo-soja y la expansión de la frontera agrícola hacia el oeste de la región.

- La elevada tasa de extracción de nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo, sin la reposición correspondiente por intermedio de fertilizantes químicos. En este período se produce la difusión de híbridos de alto potencial de rendimiento siendo muy bajos los niveles de fertilización.
- Modificación del régimen de manejo de la tierra mediante el cual los contratistas, dueños de la maquinaria agrícola, son los que toman las decisiones sobre el manejo del suelo, reemplazando en esta tarea al propietario de la tierra y sin asesoramiento técnico.

La modalidad de producción mencionada intensificó los procesos de degradación de los suelos con un progresivo deterioro de la capacidad productiva, incremento de los impactos de sequías, mayores costos de producción y descenso de los rendimientos en tierras degradadas. Estos procesos se manifiestan con mayor intensidad en las zonas más frágiles por condiciones de escasez de agua (Región Pampeana semiárida), pendientes (subregión pampeana ondulada y periserrana del sur de la provincia de Buenos Aires) o profundidad del perfil (suelos con horizonte petrocálcico del sur de la provincia de Buenos Aires).

La intensificación de la agricultura en la Región Pampeana y el desplazamiento de las isohietas hacia el oeste (Forte Lay *et al.*, 2008), provocó el desmonte de los bosques de caldén en la provincia de La Pampa sobre suelos de alta susceptibilidad a la erosión eólica. También en la provincia de Entre Ríos, la frontera avanzó sobre los bosques de ñandubay, en suelos susceptibles a la erosión hídrica.

Es importante señalar que el proceso de agriculturización de la Región Pampeana afectó negativamente también a regiones extrapampeanas. Con el estímulo del ciclo húmedo imperante y el escaso valor de la tierra, comenzó un importante proceso de expansión de la frontera agropecuaria en la región Chaqueña. Este proceso provocó la ganaderización de la frontera oriental y la expansión del cultivo de poroto y la ganadería en la frontera occidental en una primera etapa, y luego, la difusión del cultivo de soja en otras provincias del norte argentino, como Santiago del Estero, Chaco, Salta y Tucumán.

1.2. Sequías en la Región Pampeana

La sequía es un período anormalmente seco cuya falta de precipitaciones es lo suficientemente prologado como para causar serios problemas hidrológicos (Hunt *et al.*, 2009). Las sequías constituyen una adversidad climática con efectos negativos en los aspectos socio-económicos de un país y cuyas características de intensidad y frecuencia de ocurrencia están asociadas con cada región. García y Calvo (2008) realizan una interesante diferenciación entre rachas secas y sequía en la cuenca del río-rambla Guadalentín, afluente del Segura en el sureste de España, para el período 1950 - 2004. Diferencian los conceptos de sequía y racha seca y señalan la importancia de los impactos socioeconómicos de la primera.

El conocimiento de los diferentes conceptos de sequía constituye una herramienta en el desarrollo de modelos que estudian sus características y su severidad. La sequía es un fenómeno complejo que incluye aspectos meteorológicos, hidrológicos y agronómicos. Se puede decir que es la escasa disponibilidad de agua en una región por un largo período de tiempo. Su principal causante es la variabilidad de las precipitaciones que pueden tener lugar en zonas húmedas o secas.

En las estadísticas de lluvia predominan las variaciones interanuales o decenales (IPCC, 2011). Su carácter recurrente hace que puede aparecer en cualquier lugar y es causa de pérdidas generalizadas, principalmente en agricultura (Mishra y Singh, 2010). Algunas variaciones de otros elementos climáticos como altas temperaturas, alta velocidad del viento, baja humedad relativa, distribución de los días con precipitaciones durante el ciclo de crecimiento de un cultivo, intensidad y duración de la precipitación, juegan un papel significativo en la ocurrencia de sequías e influyen la evapotranspiración.

Durán sostiene que «la variación de la precipitación en un lugar dado y entre épocas determinadas constituye el factor de impulso principal de las sequías. A su vez, dependen del condicionamiento impuesto por los cambios en la presión atmosférica con las consiguientes alteraciones en la circulación general de la atmósfera. Las sequías están asociadas a condiciones predominantemente anticiclónicas que persisten durante un cierto tiempo» (Durán, 2002: 1).

Wilhelmi and Wilhite (2002) mencionan que los componentes de las sequías se pueden caracterizar como: *Riesgo natural (hazard)*: el intrínseco a la marcha o cambio climático, pero que ocurre sin intervención ni control humano, y sí tiene un efecto directo cuantificable en los sistemas humanos; *Vulnerabilidad*: comprende los factores sociales, como la población y sus actividades, así como las características ambientales susceptibles a las condiciones adversas de la sequía. La vulnerabilidad está determinada por la habilidad para anticiparse, resistir y recobrase de la presencia de la sequía; y *Riesgo total (risk)*: es el efecto potencial adverso de la sequía, como producto de su frecuencia, severidad y duración.

Dado que las sequías están estrechamente relacionadas con la variabilidad climática y su influencia directa en los suelos resulta relevante un análisis que permita identificar patrones temporales y espaciales de las sequías a escala regional para poder determinar áreas de riesgo.

Mishra y Singh (2010 y 2011) han realizado un exhaustivo trabajo en la recopilación y sistematización de la bibliografía sobre sequías en la que se destaca el uso del Índice de Severidad de Sequía de Palmer y el Índice Estándar de Precipitación, ambos basados en la precipitación y, destacaron, por otro lado, la escasez de estudios que utilicen el balance de agua en el suelo, principalmente en Sudamérica. En el primer trabajo mencionado, ellos sostienen que todos los índices desarrollados en la bibliografía son de utilidad y todos tienen «ventajas y desventajas». Sanz (2006) tras analizar los índices de sequía más conocidos propone un índice geográfico basado en lo espacial, el *xerocora*, en el que une los conceptos de seco con el de comarca o territorio, con datos de precipitación mensual, que pueda definir el área de sequía. En el territorio español separa sequía extrema, grave, moderada, leve, absoluta y progresiva.

El Índice de Humedad de un cultivo desarrollado por Palmer en 1968 es un índice específico para sequía agrícola que se basa en la comparación de las condiciones de sequía al comienzo de una semana con la recarga o con el déficit de agua en el suelo durante la semana. El Índice de Humedad (SMI), basado en el contenido de agua en el suelo y con capacidad de campo y punto de marchitez conocidos, con ocho años de observaciones realizadas en Nebraska (Hunt *et al.*, 2009), puede identificar rápidamente la sequía agrícola por el estado del suelo en relación a la habilidad de las plantas para extraer agua y cuando la evapotranspiración se torna limitante en un punto entre las mencionadas constantes hidrológicas. La humedad del suelo es una variable hidrológica significativa en relación con las inundaciones y las sequías y juega un papel importante en el proceso de convertir la precipitación en escorrentía y las aguas subterráneas de almacenamiento. Tang y Piechota (2009) señalan que la humedad del suelo tiene un rol muy importante en el

intercambio de vapor de agua entre la tierra y la atmósfera, un alto contenido de humedad en el suelo promueve el crecimiento de la vegetación y, principalmente en el verano, esto conlleva a un aumento de la evapotranspiración.

Las sequías son generalmente clasificadas en cuatro categorías: meteorológica, hidrológica, agrícola y socioeconómica (Wilhite y Glantz, 1985; American Meteorological Society, 2004; y Pérez Ballari *et al.*, 2009). Las megasequías son sequías prolongadas y extensas que duran mucho más de lo normal, generalmente un decenio o más (IPCC, 2008).

La *sequía meteorológica*, basada en datos climáticos, es una expresión de la desviación respecto a la media durante un período de tiempo determinado. Ante la dificultad de establecer una duración y una magnitud del déficit pluviométrico válidas para diferentes áreas geográficas, algunas definiciones de sequías optan por no especificar umbrales fijos, en otros casos presentan información específica para cada región particular, que varía en función del clima regional.

La *sequía agrícola*, por depender no sólo de las condiciones meteorológicas, sino también de las características biológicas del cultivo y las propiedades del suelo, no es equivalente a la sequía meteorológica. Si los niveles de humedad del subsuelo son suficientes para proporcionar agua a un determinado tipo de cultivo durante el período que dure la sequía meteorológica no llegará a producirse una sequía agrícola.

La *sequía hidrológica* hace referencia a una deficiencia en el caudal o volumen de agua superficial o subterránea (ríos, embalses, lagos, etc.). Al producirse un desfase entre la escasez de lluvias o nieves y la reducción del caudal de ríos o el nivel de lagos y embalses, las mediciones hidrológicas no pueden ser utilizadas como un indicador del inicio de la sequía, pero sí de su intensidad.

La *sequía socioeconómica* se produce cuando la disponibilidad de agua disminuye hasta el punto de producir daños (económicos o personales) a la población de la zona afectada por la escasez de lluvias. No es necesario que se produzca una restricción del suministro de agua, sino que basta que algún sector económico se vea afectado por la escasez hídrica. La sequía socioeconómica sucede a la sequía agrícola, pero en regiones poco desarrolladas, donde este sector tiene un mayor peso en la economía, y su incidencia es más directa e inmediata que en regiones desarrolladas, la sequía agrícola constituye en sí misma la sequía socioeconómica (Valiente, 2001).

Al no haber una simple definición de sequía, su comienzo y fin son difíciles de determinar. Sin embargo, se pueden determinar indicadores de sequía y su seguimiento proporciona elementos para la observación de su evolución. Determinar qué indicadores utilizar plantea más dificultades para los planificadores: en el caso de que se basen en datos recogidos de parámetros específicos (como el caudal y la capa de nieve), o en caso de que seleccione uno o más índices, que incorporan y pesan varios tipos de datos en diversas combinaciones. La comprensión de la frecuencia, duración y extensión espacial e histórica de la sequía también ayuda a los tomadores de decisiones en la determinación de la probabilidad y gravedad potencial de futuras sequías. Las características de las sequías pasadas proporcionan puntos de referencia para la proyección de condiciones similares en el futuro (Scarpati *et al.*, 2011).

En México, Ortega-Gaucin y Velasco (2013) identificaron la sequía económica como aquella relacionada con los efectos sobre las pérdidas y producciones futuras en relación a la escasez de agua. Ellos definieron:

- *Impactos económicos*: pérdidas en producción agrícola, ganadera, forestal y pesca, baja en la tasa de rendimiento económico, baja en la ganancia de los productores, comerciantes, transportistas, etc., aumento en la demanda energética, disminución en actividades industriales, baja del nivel de empleo, falta del crédito y estancamiento de actividades bancarias, reducción del flujo de activos y la disminución de los ingresos y beneficios a través de impuestos.
- *Impactos sociales*: disminución de cantidad y calidad de los alimentos, problemas de salud, aumento de la tasa de mortalidad en sectores vulnerables, conflictos entre usuarios y propietarios de fuentes de agua, baja calidad de vida e incremento de la pobreza, inestabilidad social, marginalización y migración a zonas urbanas o al exterior.
- *Impactos ambientales*: daños a los ecosistemas, incendios forestales, pérdidas de vida silvestre, erosión y pérdida de suelo, baja calidad de agua, contaminación del aire y degradación del paisaje.

D'Ámbrosio *et al.* (2013) también mencionan la clasificación desarrollada por Olcina (2001), quien definió tres tipos de sequía climática para España: sequías cantábricas, ibéricas, surestinas y canarias, que fueron diferenciadas sobre la base del análisis de datos pluviométricos y efectos territoriales y económicos padecidos por la disminución de lluvias en las regiones españolas a lo largo del siglo XX.

Rivera (2014) en su estudio sobre sequías meteorológicas señala que más allá de los incrementos en las precipitaciones en distintas escalas temporales registrados en el Sur de Sudamérica, la ocurrencia de sequías fue recurrente y tuvo impactos negativos importantes. El, además, presentó una climatología de los eventos de sequía, identificados mediante el índice de precipitación estandarizado (IPE) durante el período 1961-2008 y la tendencia evaluada por Mann-Kendall. Si bien las tendencias presentan mayormente valores que indican un incremento de las condiciones húmedas, el análisis de las tendencias no lineales indica que las mismas presentaron una reversión durante las décadas de 1980 y 1990. Dado que estas tendencias poseen un impacto considerable en la producción agrícola y en la generación de energía hidroeléctrica en la región, es necesario su monitoreo continuo y su interpretación. La reversión de estas tendencias podría traer consecuencias graves, como el retroceso de las isoyetas hacia el este y las consecuentes pérdidas en los sectores socio-económicos involucrados. Comprobó que las sequías son un fenómeno de extensión limitada, en la que actúan diversos factores locales para determinar sus valores extremos. Actualmente el IPE es utilizado en modo operacional y para investigación en más de 70 países (Organización Meteorológica Mundial, 2012).

En el caso de Argentina, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) realiza el monitoreo del IPE únicamente en la región centro-este del país, para las escalas temporales de 1, 3, 6, 12, 18 y 24 meses, dejando de lado regiones donde esta adversidad es un fenómeno recurrente con un fuerte impacto a nivel socio-económico.

Rivarola (2004) caracterizó la vulnerabilidad agroclimática en el sur de la provincia de Córdoba utilizando la precipitación de setiembre a marzo del período 1961 - 1990, la capacidad de almacenaje de agua en el suelo y el déficit hídrico y un sistema de información geográfico y llegó a reconocer una zonificación gradual de este a oeste dentro del área de estudio.

Los autores de este estudio, en una publicación previa (Capriolo y Scarpati, 2012a), han mostrado diferentes escenarios en la provincia de Buenos Aires en un análisis que se centró en los valores de déficit de agua en el suelo, desde 1969 hasta 2008 y donde se propuso una clasificación. Ellos con-

sideraron un valor areal medio anual de 200 mm de déficit como umbral dado que es un límite ecológico y, un valor superior a éste, indica que el daño por sequía, es la consecuencia. Este criterio es el mismo que se sigue en el presente trabajo. Estos autores dividieron los eventos de sequía en leves, moderados, severos y fuertes según el valor del déficit anual de agua en el suelo (DAS):

DAS (mm)	≤ 200	> 200 and ≤ 300	> 300 and ≤ 400	> 400
Sequía	Leve	Moderada	Severa	Fuerte

Las precipitaciones en la Región Pampeana presentan un comportamiento cíclico que se manifiesta en periodos con una disminución o con un aumento de las lluvias, lo que implica cambios en el uso del suelo (Ameghino, 1884; Duran, 1987; Moncaut, 2003; Ras, 1994). En antiguas crónicas coloniales y posteriormente, en estudios científicos realizados con datos sistemáticos, se han señalado numerosas «anomalías» en lo que a marcha anual de las precipitaciones se refiere. Se debe recordar que en 1872 se creó el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), anteriormente Oficina Meteorológica Argentina, mediante la Ley No 559, durante la presidencia de Domingo F. Sarmiento, por ello la existencia de datos sistemáticos es relativamente corta.

La Región Pampeana ha experimentado durante las ultimas décadas del siglo XX un aumento de las precipitaciones como han señalado, entre otros, Minetti y Vargas (1997), Rusticucci y Pernalba (2000), Barros *et al.* (2000 y 2008), Magrin *et al.* (2007), Forte Lay *et al.* (2008) y Antico y Sabbione (2010). Se debe hacer mención además a la relación entre los diferentes montos de precipitaciones con las tres fases del fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENSO): El Niño, La Niña y Neutral y por ende, con la humedad del suelo (Scarpati *et al.*, 2002, 2007 y 2013 y Spescha *et al.*, 2004).

En Argentina, Minetti *et al.* (2007) analizaron los aspectos climáticos de las sequías en la pampa húmeda y concluyeron que posee un régimen donde predominan las rachas secas de corta duración que la torna propicia para la agricultura de secano. A su vez, señalaron que los períodos más secos anuales ocurrieron durante los ciclos agrícolas (primavera - verano) 1910-11, 1916-17, 1924-25, 1928-29, 1936-37, 1937-38, y 1944-45, y que el período lluvioso de las últimas décadas del siglo XX ha retraído las sequías, de tal manera que en la segunda mitad del siglo no se observaron períodos anuales tan secos como los registrados durante la primera mitad; y además que una vez filtrado el efecto de larga escala (tendencia), surge que las sequías de los años 1975-76 y 1988-89 fueron también importantes.

Scarpati y Capriolo (2013) estudiaron la distribución de sequías e inundaciones en la provincia de Buenos Aires comenzando con el análisis de las precipitaciones como fuente principal de agua en la provincia y, luego, con los resultados del balance de agua en el suelo, los déficit y los excesos de agua en el suelo, y completaron un estudio más detallado de algunos eventos hidrológicos extremos y su distribución espacio-temporal.

Serios fenómenos de sequías se han observado en la Región Pampeana, ocasionados por escasas precipitaciones como mencionan Forte *et al.* (2007) y Botana *et al.* (2009). Al respecto, Minetti *et al.* (2010) encontraron que su principal causa está condicionada por la actividad del anticiclón del Océano Atlántico y su interacción con la depresión continental en la Pampa húmeda.

Las imágenes de las sequías presentadas en el Atlas realizado por Ravelo *et al.* (2014) permiten identificar donde y cuando se produjeron los eventos extremos de deficiencia hídrica en Argenti-

na, utilizando el *índice de severidad de sequía* de Palmer, el índice estandarizado de precipitación y el índice de vegetación de diferencia normalizada.

La sequía del año 2008 afectó a todo el país, murieron cerca de un millón de cabezas de ganado y en la provincia de Buenos Aires el gobierno nacional declaró el Desastre Agropecuario, destacando entre las áreas más afectadas a Patagones, Villarino, Bahía Blanca y Puan, o sea el sur de la provincia que presenta un predominio de la agricultura en tierras secas situadas en áreas por debajo de la línea de 600 mm de isoyetas anuales (partidos con déficit de agua frecuentes) como estudiaron Ferreli (2012) y D'Ámbrosio *et al.* (2013).

La Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable (SAyDS) de Argentina, en Junio de 2015 propuso el proyecto Aumentando la Resiliencia Climática y Mejorando el Manejo Sostenible de la Tierra en el Sudoeste de la Provincia de Buenos Aires que va a ser implementado a partir de una donación del Fondo de Adaptación al Cambio Climático de Naciones Unidas. Su objetivo es reducir la vulnerabilidad de los sistemas agrícola ganaderos en el área ante los procesos de desertificación potenciados por el cambio climático y la variabilidad a través de medidas relacionadas al manejo sostenible de tierras (SAyDS, 2015).

La SAyDS inició en 1995 la elaboración del Programa de Acción Nacional de Lucha contra la Desertificación y Mitigación de los efectos de la Sequía. En 1998 se decidió poner en marcha la coordinación de un grupo de científicos pertenecientes a distintas instituciones, tales como el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Instituto Nacional del Agua y del Ambiente (INAA), Gobiernos Provinciales, Universidades Nacionales y ONGs para la elaboración de un Sistema de Alerta Temprana de la Sequía, según lo dispuesto en el artículo 10 inciso 3 de la Convención de las Naciones Unidas. El objetivo general de este grupo, es desarrollar y llevar adelante el proyecto, para ello se han realizado distintos encuentros en los cuales se discutieron las diferentes propuestas para definir una metodología adecuada a las necesidades del país. Con datos aportados por el SMN, se confeccionó un mapa de vulnerabilidad de la Región Pampeana, en base al método conocido como índice de Pálmer. Hasta la fecha no se ha concretado el tan ansiado alerta temprana de las sequías en esta región.

En este trabajo se analiza la evolución y distribución de los eventos de sequías agrícolas que han tenido lugar en la Región Pampeana argentina en el período 1950 - 2010. Se toma como índice de ocurrencia de ellos, el valor anual del déficit de agua en el suelo y, además, se clasifican según el valor alcanzado por este componente del balance de agua del suelo.

2. Materiales y métodos

En este estudio se han utilizado datos diarios de precipitación del Servicio Meteorológico Nacional del período 1950 - 2010, de estaciones meteorológicas que se observan en el Cuadro 1. Ellas se han ubicado en él siguiendo un orden latitudinal y son completas y presentan las características de homogeneidad.

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas utilizadas

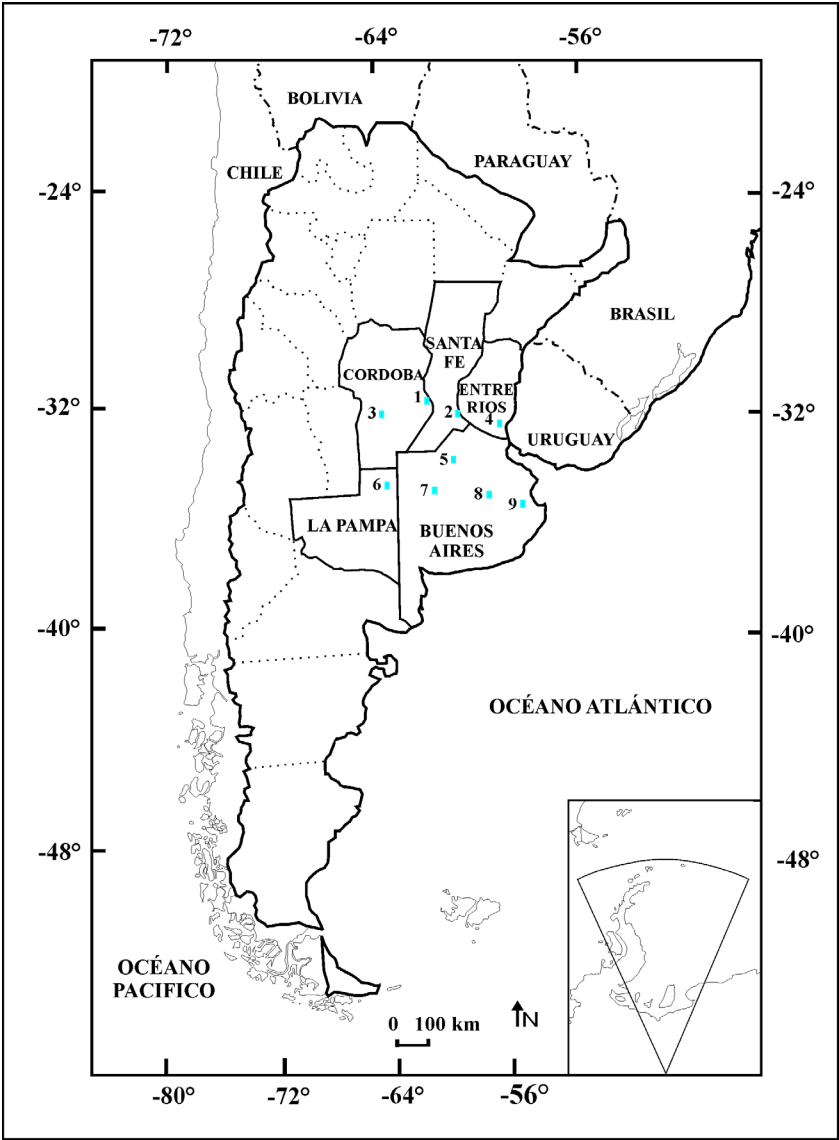
Número en el mapa 1	Nombre	Latitud S	Longitud W	Altura (m)
1	Marcos Juárez	32° 41'	62° 07'	110

Número en el mapa 1	Nombre	Latitud S	Longitud W	Altura (m)
2	Rosario	32° 55'	60° 47'	25
3	Río Cuarto	33° 07'	64° 14'	421
4	Gualeguaychú	33° 00'	58° 37'	21
5	Junín	34° 43'	60° 55'	81
6	General Pico	35° 42'	63° 45'	145
7	Pehuajó	35° 52'	61° 52'	87
8	Las Flores	36° 02'	59° 06'	33
9	Dolores	36° 21'	57° 44'	9

Fuente: elaboración propia.

La región en estudio se puede observar en el Mapa 1.

Mapa 1. Región en estudio y localización de las estaciones meteorológicas utilizadas



Fuente: elaboración propia.

Balance de agua en el suelo: Las variaciones espaciales y temporales experimentadas por el contenido de agua en el suelo ha sido estudiado siguiendo a Forte Lay *et al.* (2008), el cual se basa en el balance diario de agua en el suelo de Thornthwaite y Mather (1955), usando datos de precipitaciones diarias de estaciones meteorológicas dependientes del Servicio Meteorológico Nacional del período 1950 - 2010. La evapotranspiración potencial media diaria ha sido estimada por la fórmula de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2004).

La ecuación 1 muestra el modelo de balance de agua en el suelo utilizado:

$$PP - EP + \Delta \text{ Alm} + \text{Exc} + \text{Def} = 0 \text{ (Ecuación 1)}$$

donde:

PP: precipitación diaria

EP: evapotranspiración potencial media

$\Delta \text{ Alm}$: variación del almacenaje de agua en el suelo

Exc: exceso de agua en el suelo

Def: déficit de agua en el suelo

Las constantes hidrológicas: capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) fueron obtenidas «in situ» (Forte *et al.*, 2008). Capriolo y Scarpati (2012b) explican los conceptos con los que se trabaja: el almacenaje de agua en el suelo está constituido por dos partes: el contenido de agua disponible y aquel que no está disponible. A su vez, el primero, el contenido de agua disponible, se divide en dos: el contenido óptimo (50 a 80% de agua útil) y el nivel de sequía condicional (0 a 50% de agua útil).

La sequía absoluta se encuentra cuando el suelo tiene 0% de agua útil, mientras que el PMP es el límite entre los dos últimos, y el nivel de sequía condicional representa el límite superior (Scarpati *et al.*, 2011).

Todos estos parámetros experimentan variaciones de acuerdo a la textura del suelo y la profundidad efectiva (zona radical) que depende de la existencia de un horizonte restrictivo. Algunos suelos con alta profundidad radical alcanzan 1 metro o más y tienen una alta CC. Otros suelos, con baja profundidad de exploración de raíces, sólo alcanzan poca profundidad y su CC disminuye.

El balance de agua en el suelo en este estudio se ha calculado para todas las estaciones analizadas, para cada año del período estudiado y así se obtuvieron los valores de déficit de agua.

Elaboración de mapas de isohietas: En la elaboración de los mapas de isohietas anuales se han utilizado datos de 41 estaciones meteorológicas de la Región Pampeana, que fueron seleccionadas por su largo registro y homogeneidad (Forte Lay *et al.*, 2008). Ellos se han realizado mediante el software Surfer 8.0 que permite la realización de mapas con isolíneas utilizando la opción kriging y que estima los valores de la grilla de nodos, con los valores de cada estación ingresados al software.

Análisis estadístico: El software Makesens se utiliza para detectar y estimar tendencias en las series temporales de déficit anual de agua en el suelo ya que aplica los test no paramétrico Mann-Kendall para detectar y el Sen para el cálculo de la magnitud de la tendencia (Salmi *et al.*, 2002). El Makesens permite obtener resultados con significancia a los niveles (α) de 0,001, 0,01, 0,05 y 0,1 (Liu *et al.* 2009).

El test Mann-Kendall no requiere que los datos respondan a la distribución normal y es muy usado para encontrar tendencias en series temporales de datos hidrometeorológicos y está ampliamente documentado en la bibliografía especializada (Eris y Agiralioglu, 2012)

Por todo lo expresado, en el presente estudio, se utiliza el test no paramétrico de Mann-Kendall y la magnitud de la tendencia se estima por el método no paramétrico Sen para todos los índices climáticos mencionados y para el período 1950 – 2010. Estos métodos son aún más sensibles a oscilaciones de elementos del clima y han sido ampliamente probados.

3. Resultados y discusión

Los resultados de los balances de agua en el suelo se muestran, a continuación, en Gráficos, Mapas y Cuadros que permiten su presentación y comprensión. En primer término, se pueden observar los valores obtenidos del déficit de agua en el suelo, su valor medio y la tendencia encontrada para cada estación estudiada.

En todas ellas sobresale la existencia de déficit de agua en el suelo en todos los años analizados y en todas las estaciones, o sea no hay año, aún en la región húmeda pampeana, sin déficit de agua, y se observan variaciones en sus valores, que cambian de acuerdo a su ubicación geográfica y por ende, su clima.

Luego, para cada estación, se analiza la evolución de los déficits de agua en el suelo y se señala, además de los máximos valores alcanzados, la cantidad de años con valores menores a los anteriores, pero que también implicaron peligro de ocurrencia de daños.

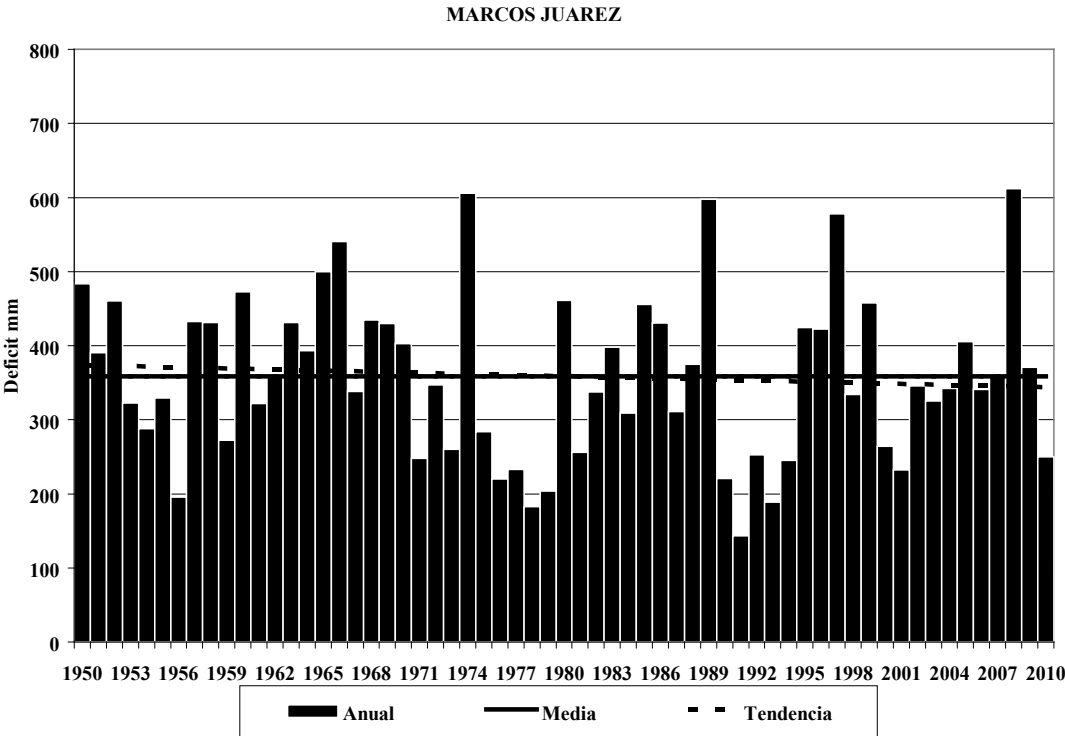
El Gráfico 1 permite observar la información obtenida para la estación Marcos Juárez, donde hay un valor medio de déficit de agua en el suelo de 358 mm y la presencia de una leve tendencia negativa. Los valores de déficit oscilan entre bajos de 100 mm y altos que pueden superar los 600 mm, como ocurrió en el año 2008 en que se llegó al máximo valor con 612 mm, siguiéndole 606 mm en 1974, 597 mm en 1989, 578 mm en 1997 y 540 mm en 1966. Además, en esta localidad, en 16 años se superaron los 400 mm de déficit.

El Gráfico 2 muestra la evolución del déficit de agua en el suelo en la estación Rosario, cuyo valor medio es 367 mm. El máximo valor alcanzado fue 598 mm en 1974 y le siguen 560 mm en el año 2008, 551 mm en 1964, 526 mm en 1983, 522 mm en 1960 y 515 mm en 1965. Los valores de déficit mayores a 400 mm tuvieron lugar en nueve años.

El Gráfico 3 muestra la estación Gualeguaychú con una media de 292 mm de déficit de agua en el suelo y sobresalen los valores alcanzados en 1960 con 526 mm, 1962 con 533 mm, 1979 con 543 mm y en 2008 con 530 mm y, además, se encontraron 7 años con valores mayores a 400 mm.

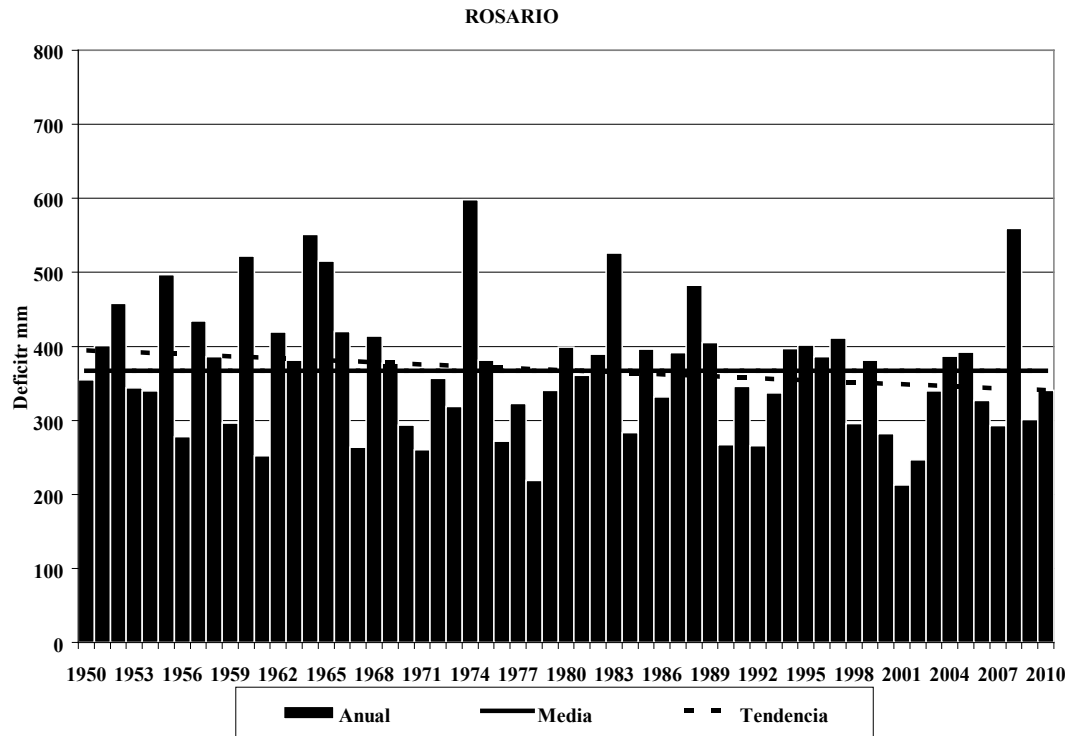
En la estación Río Cuarto (Gráfico 4) se observan valores muchos más altos de déficit de agua en el suelo con respecto a las demás estaciones. Aquí, aparecen valores mayores a 700 mm, como ser en 1950 (764 mm), en 1971 (773 mm) y en 2003 (704 mm). Los valores superiores a 600 mm se encontraron también en varios años, como ser en 1951 con 673 mm, 1965 con 641 mm, 1970 con 667 mm, 1976 con 640 mm, 1986 con 677 mm, 1989 con 692 mm y en 2006 con 602 mm. Por otro lado, se hallan valores mayores a 500 mm en 18 años, mayores a 400 mm en 25 años y el valor medio es 516 mm.

Gráfico 1. Déficit de agua en el suelo en la estación Marcos Juárez: valores anuales, medio y tendencia



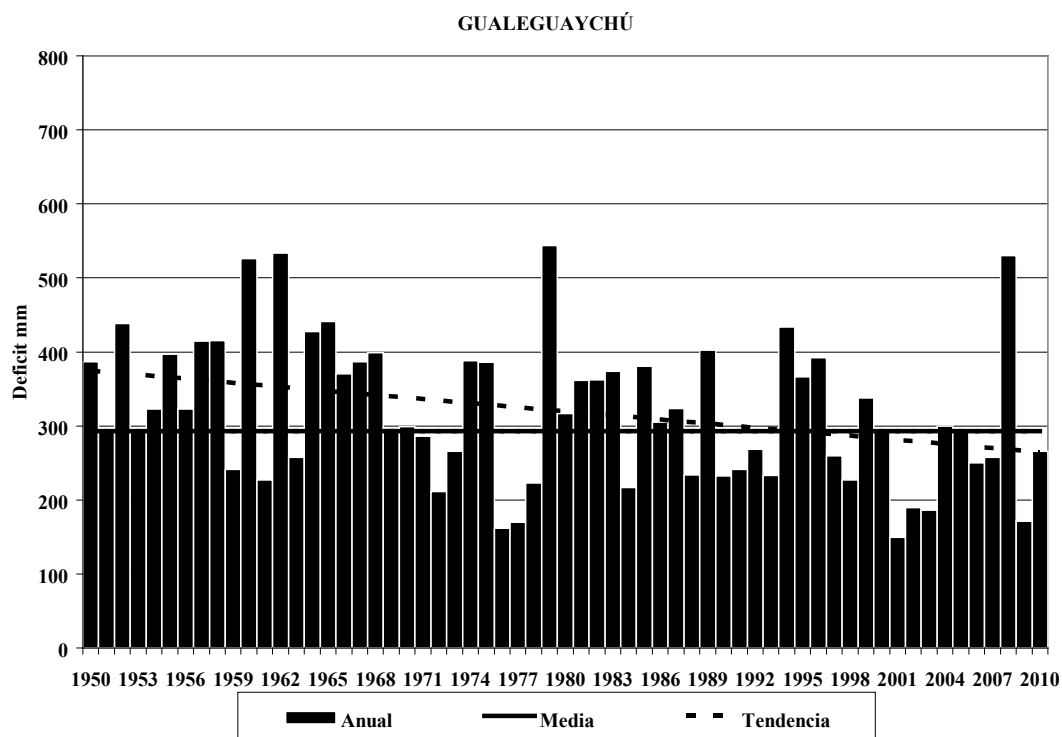
Fuente: elaboración propia.

Gráfico 2. Déficit de agua en el suelo en la estación Rosario: valores anuales, medio y tendencia



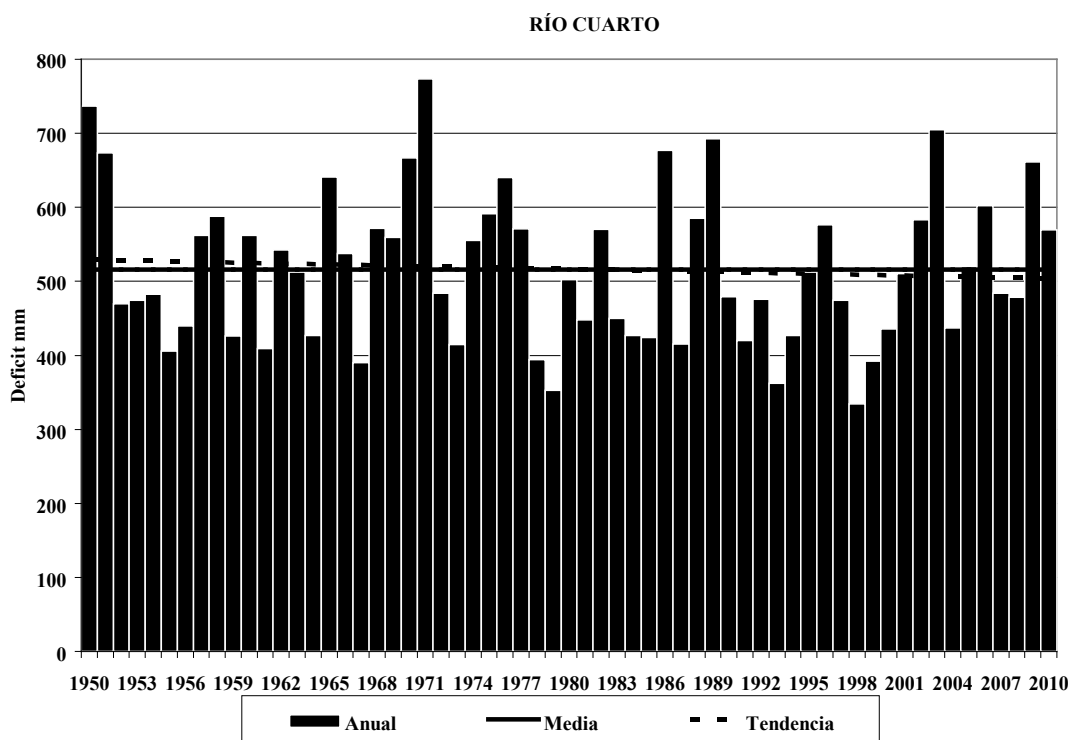
Fuente: elaboración propia.

Gráfico 3. Déficit de agua en el suelo en la estación Gualeguaychú: valores anuales, medio y tendencia



Fuente: elaboración propia.

Gráfico 4. Déficit de agua en el suelo en la estación Río Cuarto: valores anuales, medio y tendencia



Fuente: elaboración propia.

El Gráfico 5 muestra la distribución del déficit de agua en el suelo para la estación Junín, donde siempre los valores fueron menores a 500 mm. El valor más alto tuvo lugar en 1950 con 469 mm, siguiéndole 1960 con 448 mm, 1968 con 458 mm, 1972 con 448 mm, 1957 con 435 mm, 1955 con 408 mm, 2008, 405 mm y 1965 con 404 mm. El valor medio de la serie de datos es 281 mm.

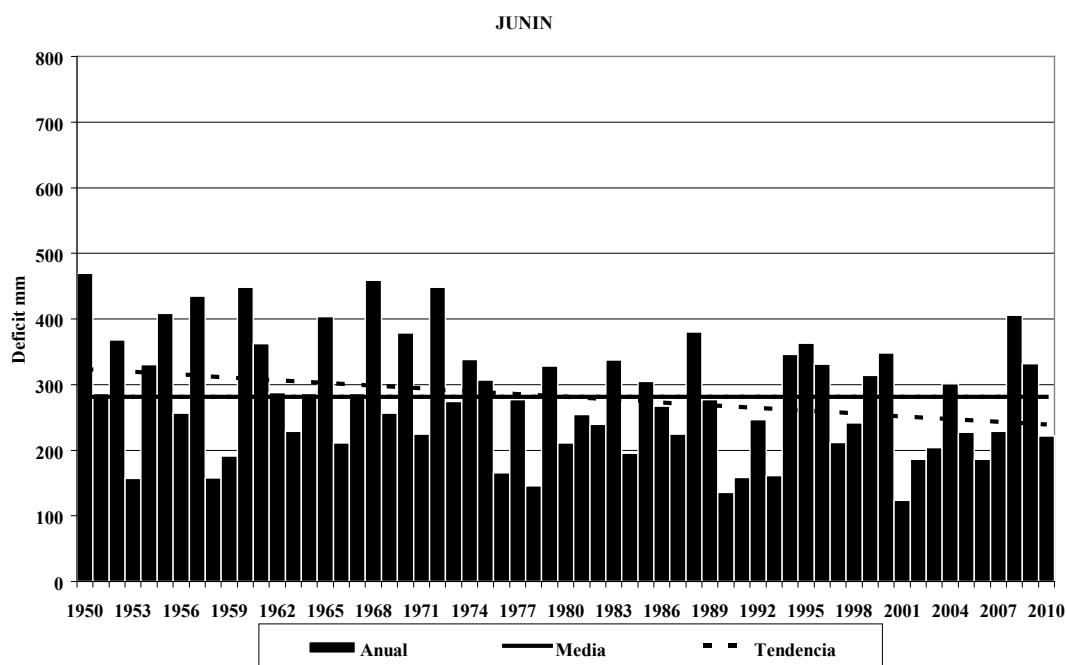
En la estación General Pico (Gráfico 6) se obtuvo un valor medio igual a 403mm. Los valores de déficit de agua en el suelo han sido altos en varios años: 1950 (612 mm), 1951 (634 mm), 1962 (645 mm), 1965 (621 mm), 1995 (504 mm), 1953 (536 mm), 1954 (551 mm), 1958 (535 mm), 1960 (569 mm), 1961 (571 mm), 1967 (544 mm), 1970 (548 mm), 1995 (504 mm), 2003 (569 mm) y 2009 (582 mm) y además, en quince años se sobrepasó los 400 mm.

En la estación Pehuajó, que se muestra en el Gráfico 7, se observa un valor medio de 329 mm. En el año 1951 se alcanzó un valor de déficit de agua en el suelo de 587 mm, en 1962, 497 mm y en 2009, 575 mm y se observan doce años con valores mayores a 400 mm.

El Gráfico 8 muestra la evolución de los datos de déficit en la estación Las Flores donde en 1950 fue de 411mm, en 1956, 405 mm, en 1957 alcanzó a 566 mm; en 1960 a 446 mm y en 1979 a 489 mm. Con posterioridad, no llegó nunca más a superar los 400 mm y el valor medio es 285 mm.

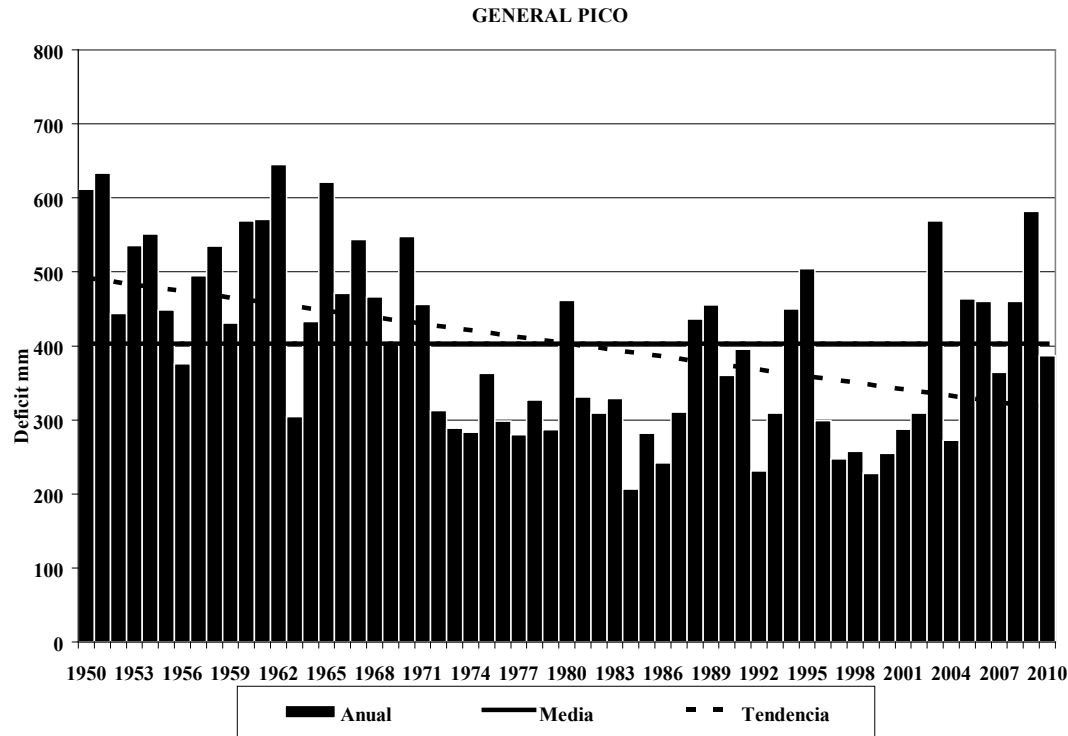
El Gráfico 9 muestra la estación Dolores, que sólo sobrepasó los 400 mm de déficit de agua en el suelo en 1979 con 401 mm y es, a su vez, el valor más alto obtenido en esta localidad, cuyo valor medio es 251 mm.

Gráfico 5. Déficit de agua en el suelo en la estación Junin: valores anuales, medio y tendencia



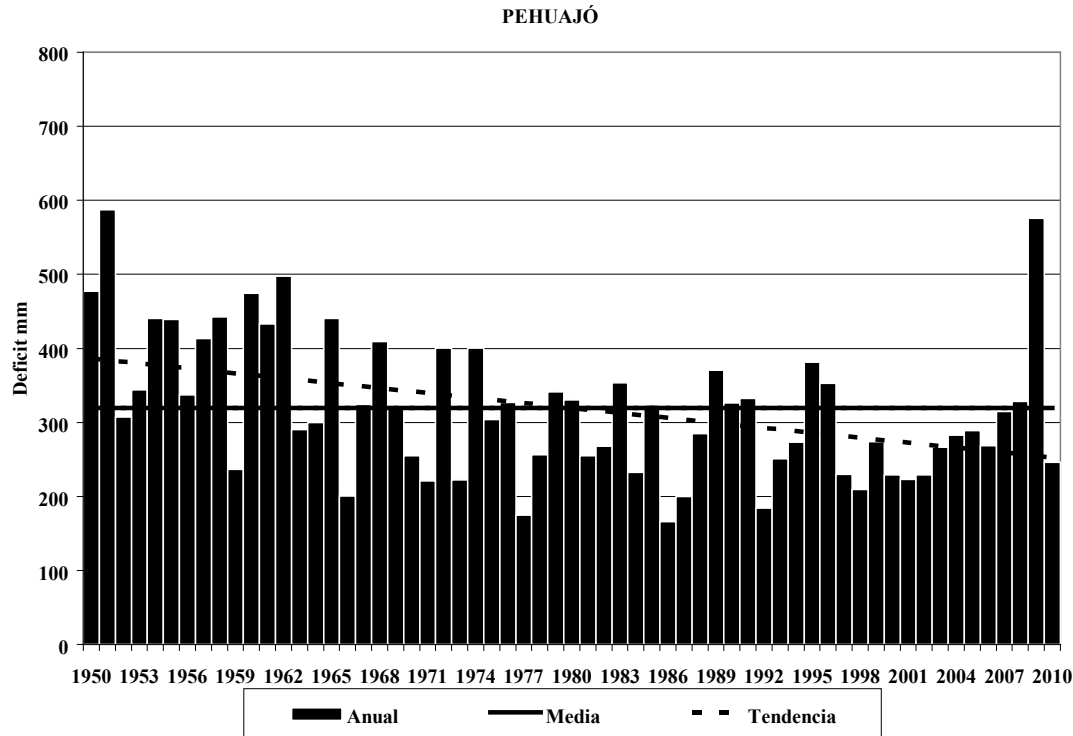
Fuente: elaboración propia.

Gráfico 6. Déficit de agua en el suelo en la estación General Pico: valores anuales, medio y tendencia



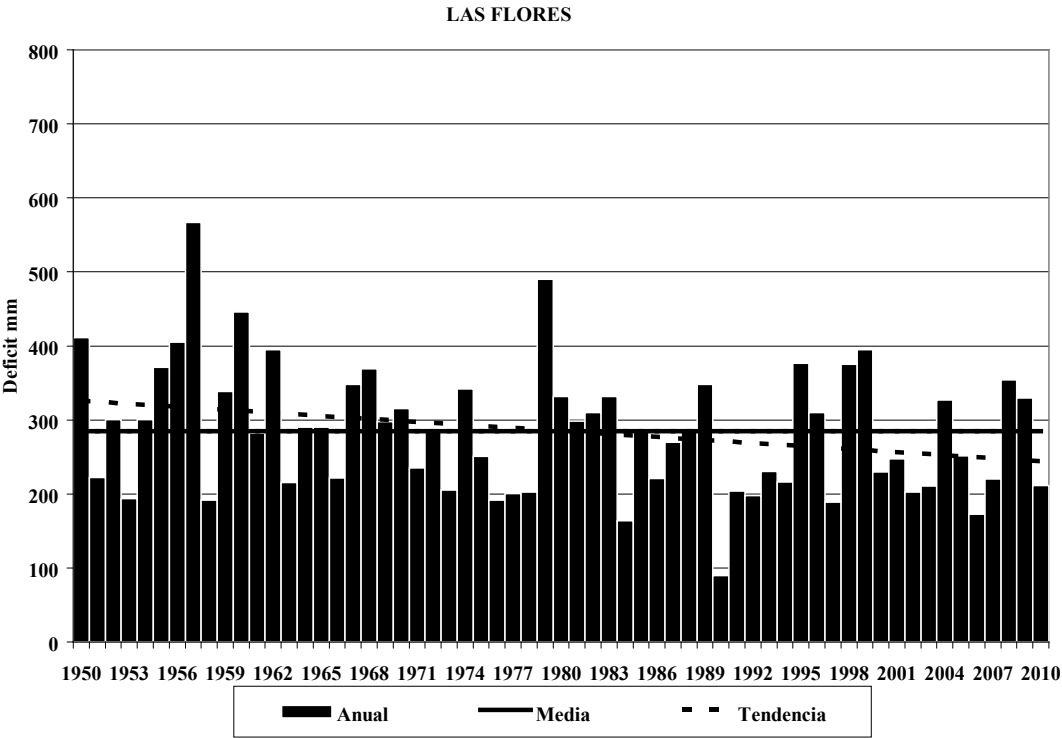
Fuente: elaboración propia.

Gráfico 7. Déficit de agua en el suelo en la estación Pehuajó: valores anuales, medio y tendencia



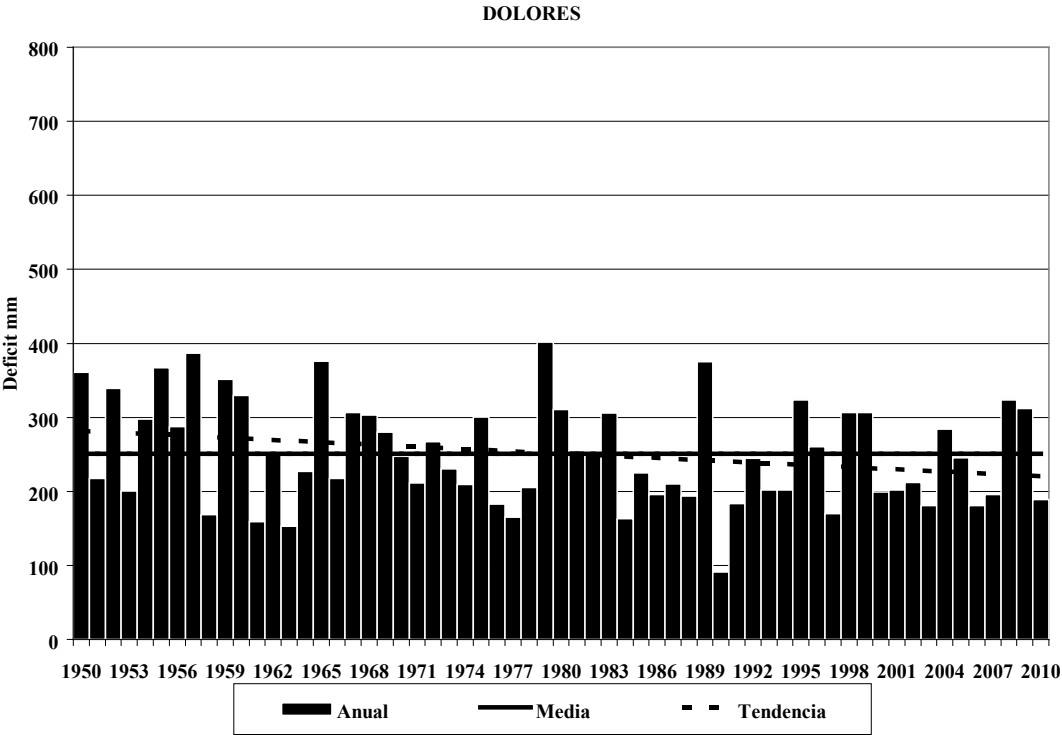
Fuente: elaboración propia.

Gráfico 8. Déficit de agua en el suelo en la estación Las Flores: valores anuales, medio y tendencia



Fuente: elaboración propia.

Gráfico 9. Déficit de agua en el suelo en la estación Dolores: valores anuales, medio y tendencia



Fuente: elaboración propia.

El Cuadro 2 resume los valores medios de déficit de agua en el suelo en orden decreciente para las nueve estaciones estudiadas. En él se observa que los mayores valores pertenecen a las dos estaciones más occidentales, Río Cuarto (orden 1) y a General Pico (orden 2) y el menor a Dolores (orden 9) que es la más oriental. Ellos se corresponden perfectamente a sus climas, pues los dos primeros representan la pampa subhúmeda seca y la última a la pampa húmeda. Entre ellas se ubica la pampa subhúmeda húmeda.

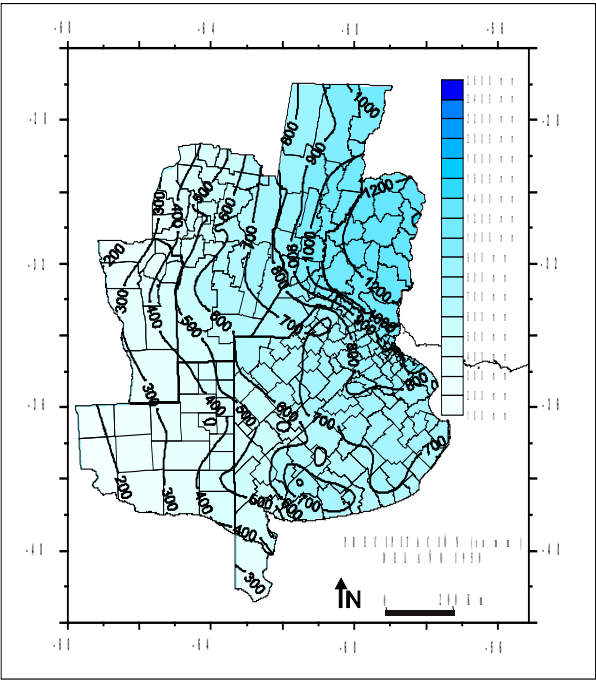
Cuadro 2. Valores medios de déficit de agua en el suelo

Estación	Valor medio del déficit de agua en el suelo (mm)	Orden
Marcos Juárez	358	4
Rosario	367	3
Gualectuaychú	292	6
Río Cuarto	516	1
Junín	281	8
General Pico	403	2
Pehuajó	329	5
Las Flores	285	7
Dolores	251	9

Fuente: elaboración propia.

Los Mapas 2, 3 y 4 muestran las precipitaciones anuales de los años 1950, 1979 y 2008 respectivamente que corresponden, a su vez, a los años con altos valores de déficit de agua en el suelo, mencionados en los Gráficos anteriores.

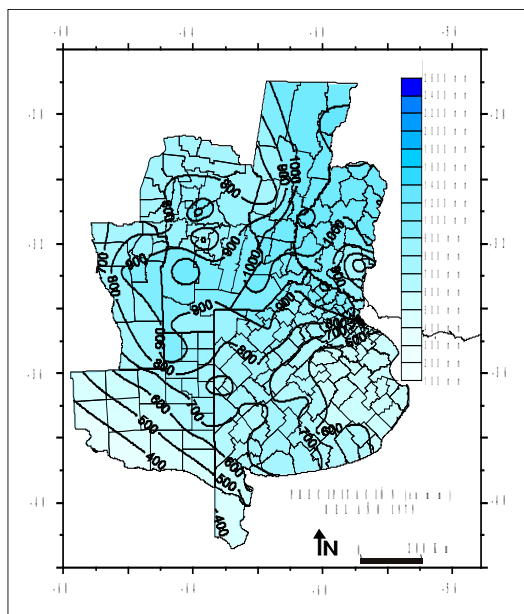
Mapa 2. Precipitación anual del año 1950



Fuente: elaboración propia.

En el Mapa 2, en el año 1950, si bien se observan valores mayores a 1.200 mm de precipitación en la provincia de Entre Ríos y también, altos valores para la provincia de Santa Fe, la precipitación ha sido relativamente baja en otras provincias, lo que implicó altos valores de déficit de agua en el suelos en las estaciones General Pico, Pehuajó y Dolores (Gráficos 6, 7 y 9).

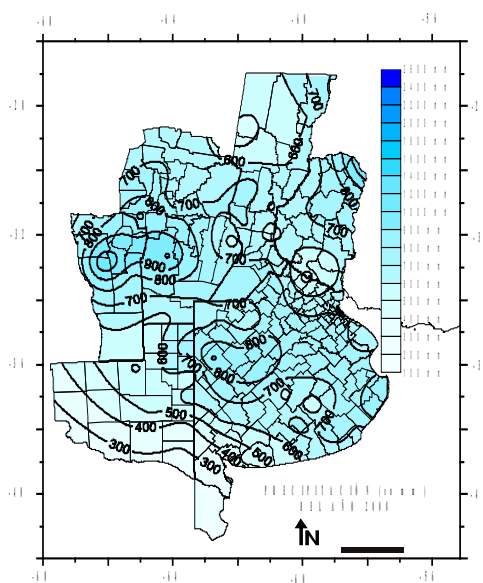
Mapa 3. Precipitación anual correspondiente al año 1979



Fuente: elaboración propia.

En el Mapa 3 se observan los valores de precipitación del año 1979, ellos son menores a los del mapa anterior en las provincias de Entre Ríos y Buenos Aires, pero mayores para la provincia de La Pampa y por ello, se observan altos valores de déficit de agua en el suelo en las estaciones Las Flores y Dolores (Gráficos 8 y 9).

Mapa 4. Precipitación media anual del año 2008



Fuente: elaboración propia.

El Mapa 4 muestra bajos valores de precipitación anual durante el año 2008 para toda la región en estudio.

El Cuadro 3 permite observar la cantidad de eventos de sequía cuyo grado de severidad se encuentra en la clasificación aplicada y mencionada anteriormente: leve, moderada, severa y fuerte. La mayoría de las estaciones experimentan eventos de todas las categorías menos Rosario y General Pico, que no experimentaron eventos leves. La estación Río Cuarto sobresale con la mayor cantidad de sequías fuertes (56 casos) y por no presentar eventos leves ni moderados y además, cinco severos. Debemos recordar que la estación Río Cuarto se ubica en la región climática entre $IH = 0$ y $IH = -20$ de la clasificación de Thornwaite. Las estaciones Pehuajó, Las Flores, Dolores y Gualaguaychú presentan más sequías moderadas y severas, mientras que las estaciones Dolores y Las Flores son las que más se destacan por no experimentar sequías severas y esto se condice muy bien con su ubicación en la Pampa húmeda.

Cuadro 3. Severidad de los eventos de sequía

Estación	Sequía			
	Leve	Moderada	Severa	Fuerte
Marcos Juárez	4	15	22	20
Rosario	0	17	27	17
Gualaguaychú	6	25	19	11
Río Cuarto	0	0	5	56
Junín	11	23	19	8
General Pico	0	16	15	30
Pehuajó	4	25	18	14
Las Flores	8	28	20	5
Dolores	16	26	18	1

Fuente: elaboración propia.

El Cuadro 4 muestra la tendencia encontrada y la distribución temporal del déficit de agua en el suelo obtenido de la aplicación del software Makesens para todas las estaciones y los distintos períodos analizados: el período completo de datos y series más cortas, o sea, de 61, 50, 40, 30, 20 y 10 años.

Cuadro 4. Tendencia resultante de los test estadísticos para distintos períodos de tiempo

Estación	Período					
	1950 -2010	1961 -2010	1971 - 2010	1981 - 2010	1991 - 2010	2001 - 2010
Marcos Juárez	↓	↓	↑	↑	↑	↑
Rosario	↓	↓	↓	↓	↓	↑
Gualaguaychú	↓**	↓*	↓	↓	↓	↑
Río Cuarto	↓	↑	↑	↑	↑*	=
Junín	↓+	↓	↓	↓	↑	↑*
General Pico	↓**	↓	↑	↑+	↑+	↑
Pehuajó	↓**	↓	=	↑	↑	↑*
Las Flores	↓+	↓	=	↓	↑	↑
Dolores	↓*	↓	↓	↑	↑	↑

Referencias: ↓ disminución, ↑ incremento y = sin variación, + tendencia con significancia al nivel $\alpha = 0,1$,
* al nivel $\alpha = 0,05$ y ** al nivel $\alpha = 0,01$.

Fuente: elaboración propia.

El Cuadro 4 permite, ante todo, observar que en el período más largo, sesenta y un años (1950–2010), muestra que todas las tendencias son decrecientes y en él, seis estaciones presentan significancia estadística. En el período de cincuenta años (1961 – 2010) se observa tendencias decrecientes en todas las estaciones con la excepción de Río Cuarto y sólo Gualaguachú tiene significancia estadística.

Las doce series de datos de déficit de agua en el suelo con significancia estadística del Cuadro 4 son:

- Estación General Pico, la serie de sus valores, en el período 1950 – 2010 tiene tendencia decreciente con un nivel $\alpha = 0,01$ de significancia y en los períodos 1981 – 2010 y 1991 – 2010 tiene tendencia creciente con una significancia de $\alpha = 0,1$;
- Estación Pehuajó, en el período 1950 – 2001 presenta un nivel de significancia igual a $\alpha = 0,01$ y tendencia decreciente y en el período 2001 - 2010, tendencia creciente y nivel de significancia $\alpha = 0,05$;
- Estación Las Flores, en el período 1950 – 2001 tienen tendencia decreciente y un nivel de significancia $\alpha = 0,1$;
- Estación Dolores, en el período 1950 – 2001 tienen tendencia decreciente y un nivel de significancia $\alpha = 0,05$;
- Estación Río Cuarto, en el período 1991 – 2010 presenta tendencia creciente y un nivel de significancia $\alpha = 0,05$;
- Estación Gualaguachú, en el período 1950 – 2010 presenta tendencia decreciente y alcanza un nivel de significancia $\alpha = 0,01$ y en el período 1961 – 2010, también con tendencia decreciente pero con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$ y
- Estación Junín, en el período 1950 – 2001 tienen tendencia decreciente con un nivel de significancia $\alpha = 0,1$ y en el período 2001 - 2010 presenta un nivel de significancia $\alpha = 0,05$ pero con tendencia creciente.

Las estaciones Rosario y Marcos Juárez no mostraron significado estadístico en sus series de datos, pero si tendencia decreciente en los dos períodos más largos, mientras que en Rosario ésta sólo cambia entre 2001 y 2010 y en Marcos Juárez, la tendencia se torna creciente a partir del período 1971 -2010.

Por otro lado, se observa que las estaciones Pehuajó y Las Flores, en el período 1971 -2010, no presentan variaciones en sus valores al igual que Río Cuarto durante 2001 - 2010 y, que con la excepción de esta última estación, en el período 2001 -2010, todas las localidades tienen tendencia creciente.

4. Conclusiones

En este trabajo, se realizó la climatología de eventos de sequía agrícola en la Región Pampeana de la Argentina utilizando un índice agroclimático como es el déficit de agua en el suelo. Las sequías se han identificado y clasificado para distintos períodos de tiempo y en nueve estaciones meteorológicas.

Las estaciones más occidentales de la región, Marcos Juárez y General Pico, son las que alcanzan los más altos valores medios del índice seleccionado y mayor cantidad de eventos de sequías agrícolas fuertes. Ambas no tienen sequías leves y sólo General Pico tuvo eventos moderados.

Las estaciones Junín, Las Flores y Dolores, exponen la menor cantidad de eventos fuertes y la mayor de leves y mostraron los menores valores medios del índice.

La mayor cantidad de eventos fuertes se observó en Río Cuarto (56) con valores de déficit anual superiores a 400 mm y luego General Pico con 30 eventos. La estación Dolores, ubicada al este de la región, y de acuerdo a su clasificación climática, presentó valores de déficit anual de agua en el suelo menor a 200 mm y sólo ha experimentado un evento fuerte en el año 1979 y 16 eventos leves.

Se ha evidenciado en General Pico y Marcos Juárez una disminución paulatina del déficit de agua en el suelo en los dos períodos más largos analizados: 1950 – 2010 y 1961 – 2010, pero luego, la tendencia se torna creciente a partir del año 1971.

Este proceso también se observa para el período 1950 – 2010 en la estación Pehuajó, y asimismo, luego cambia y se torna creciente en la primera década de presente siglo.

Las estaciones Las Flores y Dolores, en los períodos 1950 – 2001 y 1961 – 2010 tienen tendencia decreciente, pero a partir de 1991 – 2010, el sentido de la misma se invierte. La estación Río Cuarto manifiesta oscilaciones: tiene tendencia decreciente en el período completo, se muestra sin variaciones en el período 2001 – 2010 y en los períodos intermedios presenta tendencia creciente.

El déficit de agua en el suelo presenta tendencia decreciente en todas las estaciones, en todos los períodos estudiados, menos en el último período (2001 – 2010) en Rosario, Gualaguaychú y Junín.

El índice agroclimático seleccionado se observa todos los años del período analizado (1950 – 2010) y en todas las estaciones, con la diferencia de los montos alcanzados del mismo ya que son acordes al clima y al subclima al que pertenecen.

Por todo lo antedicho, se evidencia la necesidad de tomar medidas que estén encaminadas a la prevención temprana de los fenómenos de sequías que se puedan presentar en un lugar determinado, para esto, se debe contar con un sistema de alerta temprana para adelantarse a las consecuencia que este fenómeno pueda provocar. Una forma de lograrlo es con el continuo monitoreo del contenido de agua en el suelo.

5. Referencias bibliográficas

- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D. y M. Smith. (2004). Irrigation and drainage. *Crop Evapotranspiration—Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO: Rome, Italy. Paper 56, p. 301.
- Ameghino, F. (1884). *Las secas y las inundaciones en la Provincia de Buenos Aires. Obras de retencion y no de desagüe*. M. A. A. de la Provincia de Buenos Aires, 1884-1984.
- American Meteorological Society (AMS). (2004). Statement on meteorological drought. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, núm. 85, 771-773.
- Antico, P. L. y N. C. Sabbione (2010). «Variabilidad temporal de la precipitación en la ciudad de La Plata durante el periodo 1909-2007: tendencias y fluctuaciones cuasiperiodicas». *GEOACTA*, num. 35, pp. 44-53
- Barros, V.; M. Gonzalez; B. Liebmann y I. Camilloni, (2000). «Influence of the South Atlantic convergence zone and South Atlantic sea surface temperature on interannual summer rainfall variability in South-Eastern South America». *Theor. Appl. Clim.*, núm. 67, 123–133.
- Barros, V. Doyle, M. y Camilloni, I. (2008). «Precipitation trends in southeastern South America: Relationship with ENSO phases and with low-level circulation». *Theoretical and Applied Climatology*, núm. 93, 19-33.

- Botana, M. I., A. Pérez Ballari y O. E. Scarpati. (2009). «Patrones de distribución espacial y temporal de las sequías un aporte desde la Geografía Física». En: Caminando en una América Latina en transformación. Cáp. 7-Procesos de la interacción sociedad-naturaleza. Universidad de la República. Montevideo, Uruguay. Págs. 1- 8.
- Capriolo, A. D. y O. E. Scarpati. (2012 a). «Extreme hydrologic events in north area of Buenos Aires province (Argentina)». *International Scholarly Research Network. ISRN Meteorology*. Vol. 2012, 1-9.
- Capriolo A. D y O. E Scarpati. (2012 b). «Modeling the distribution of agricultural drought by means of soil water deficit». *Energy and Environment Research*; Vol. 2, núm. 2, 1-12; Canadian Center of Science and Education.
- Casas, R. R. 1998. Causas y evidencias de la degradación de los suelos en la región Pampeana. En: *Hacia esa agricultura productiva y sostenible en la Pampa*. Harvard University; David Rockefeller Center for Latin American Studies; Consejo Profesional de Ingeniería Agronómica. Orientación Gráfica Editora S.R.L. Buenos Aires.
- Casas, R. R. (2001). La conservación de los suelos y la sustentabilidad de los sistemas agrícolas. Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria, tomo LV, 247 pp.
- D' Ambrosio, G. T., V. Bohn y M. C. Piccolo. (2013). «Evaluación de la sequía 2008 – 2009 en el oeste de la Región Pampeana (Argentina)». *Cuadernos Geográficos*. Vol. 52, núm. 1, Ed. Universidad de Granada. España.
- Durán, D. (1987). *Sequías e inundaciones. Propuestas*, OIKOS, Asociación para la promoción de los estudios territoriales y ambientales.
- Durán, D. (2002). *Las sequías como riesgo natural*. Sitio Argentino de Producción Animal. Disponible en: http://www.produccion-animal.com.ar/inundacion/07-sequias_riesgo_natural.pdf
- Eris, E. y N. Agiralioglu. (2012). «Homogeneity and trend analysis of hydrometeorological data of the Eastern Black Sea Region, Turkey». *Journal of Water Resource and Protection*, vol. 4, 99–105.
- Ferreli, F. (2012). «La sequía 2008-2009 en el Sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina)». *Ecosistemas*, núm. 21 (1-2): 235-238. Enero-Agosto.
- Forte Lay, J. A., R. M. Quintela y O. E. Scarpati. (1992). «Variación de las características hidrometeorológicas de la llanura pampeana Argentina». *Memoria del Encuentro Meteo 92*. Tomo II. Pág. 142-146, España.
- Forte Lay, J.; O. E. Scarpati, y A. Capriolo. (2008). «Precipitation variability and soil water content in pampean flatlands (Argentina)». *Geofísica Internacional*, núm. 47 (4), 341-354.
- García Marín, R. y Calvo, F. (2008). «Frecuencia y evolución de rachas secas en la cuenca del Guadalentín (Sureste de España)». *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, núm. 48, 71-89.
- Hunt, E. D., K. G. Hubbard, D. A. Wilhite, T. J. Arkebauer y A. L. Dutcher. (2009). «The development and evaluation of a soil moisture index». *Int. J. Climatol.*, núm. 29 (5), 747-759.
- IPCC, Grupo Gubernamental de Expertos sobre el Cambio climático. (2008). Documento Técnico VI del IPCC. *El Cambio climático y el agua*. OMM. PNUMA.
- IPCC (2011). Summary for policymakers. In *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation* (eds. Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Matschoss, P., Kadner, S., Zwickel, T., Eickemeier, P., Hansen, G., Schlomer, S., von Stechow, C.). Cambridge University Press, Cambridge and New York.
- Liu, S.; Mo, X.; Zhao, W.; Naeimi, V.; Dai, D.; Shu, C. y Mao, L. (2009). «Temporal variation of soil moisture over the Wuding River basin assessed with an eco-hydrological model, in-situ observations and remote sensing». *Hydrol. Earth Syst. Sci.* núm. 13, 1375–1398.
- Magrin, G., M. Travasso, W. Baethgen, M. Grondona, A. Gimenez, G. Cunha y G. Rodríguez. (2007). Past and Future Changes in Climate and their Impacts on Annual Crops Yield in South East South America. Proc.TGICA Workshop, IPCC WG I. Nadi, Fiji.
- Mishra, A. K. y V. P. Singh. (2010). «A review of drought concepts». *J. Hydrol.*, núm. 391 (1-2), 202-216.
- Mishra Ashok, K., y Vijay P. Singh. (2011). «Drought Modeling-A Review». *Journal of Hydrology*, 403(1-2), 157-175.
- Minetti, J. y W. Vargas. (1997). «Trends and jumps in the annual precipitation en South America on the 15°S». *Atmósfera*, núm. 11, 204–221.
- Minetti, J. L., W. M. Vargas, B. Vega y M. C. Costa. (2007). «Las sequías en la Pampa Húmeda: impacto en la productividad del maíz». *Revista Brasileira de Meteorologia*, Vol. 22, núm. 2, 218-232
- Minetti, J. L., W. M. Vargas, A. G. Poblete y M. E. Bobba. (2010). «Regional drought in the southern of South America - physical aspects». *Revista Brasileira de Meteorologia*, Vol. 25, núm. 1, pp. 88-102.

- Moncaut, C. A. (2003). Inundaciones y sequías tienen raíces anejas en la pampa bonaerense (1576-2001). En Maiola, O. C., N. A. Gabellone y M. A. Hernandez (eds.), *Inundaciones en la region pampeana*. Honorable Cámara de Diputados de la provincia de Buenos Aires, Universidad Nacional de La Plata, Editorial de la Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires.
- Olcina Cantos, J. (2001). «Tipología de sequías en España». *Ería*, Revista cuatrimestral de geografía, núm. 56, 201-227
- Organización Meteorológica Mundial. (2012). *El tiempo, el clima y el agua, motores de nuestro futuro*. OMM, núm. 1084, 40.
- Ortega-Gaucin, D. e I. Velasco. (2013). «Aspectos socioeconómicos y ambientales de las sequías en México. Socioeconomic and environmental aspects of drought in Mexico». *Aqua-LAC* - Vol. 5, núm. 2, 78 – 90.
- Pérez Ballari A., Botana M. I. y O. E. Scarpati. (2009). «Distribución de las sequías e identificación de áreas de riesgo (Provincia de Buenos Aires, Argentina)». *Huellas*. N° 13. 130 – 146. Editorial Instituto de Geografía, Facultad de Ciencias Humanas, Universidad Nacional de La Pampa.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. PNUMA. 2012. *Geo 5. Perspectivas del Medio Ambiente Mundial. Medio ambiente para el futuro que queremos*. Disponible en <http://www.pnuma.org/geo/geo5/GEO%205%20ESPANOL%202013%20WEB.pdf>
- Quintela, R. M., J. A. Forte Lay y O. E. Scarpati. (1989 a). «Evolución de las características hidrometeorológicas de la llanura pampeana Argentina». Seminario Internacional sobre grandes llanuras. HLL - II/41/TRA.
- Quintela, R. M., J. A. Forte Lay y O. E. Scarpati. (1989 b). «Modification of the water resources characteristics of the Argentine's Pampean subhumid-dry region». 19th Conference on Agricultural & Forest. 9th Conference on Biometeorology and Aerobiology (19th AGMET). J-30-J-35.
- Ras, N. (1994). *Cronica de la frontera sur*, Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria, Editorial Hemisferio Sur, Buenos Aires.
- Ravelo, A. C., R. E. Zanvetor and P. E. C. Boletta. (2014). *Atlas de sequías de la República Argentina*. CREAN. Conicet. Universidad Nacional de Córdoba. Disponible en: http://www.crean.unc.edu.ar/atlas/atlas_sequia.html [15/08/2015]
- Rivarola, A D V. (2009) «Vulnerabilidad agroclimática a la sequía en la región centro-sur de la provincia de Córdoba». Tesis de Magister. Río Cuarto. Universidad Nacional de Río Cuarto.
- Rivera, Juan Antonio Aspectos climatológicos de las sequías meteorológicas en el sur de Sudamérica. Análisis regional y proyecciones futuras. (2014). Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_5504_Rivera.pdf. 7/3/16
- Rusticucci, M. Y O. Penalba. (2000). "Interdecadal changes in the precipitation seasonal cycle over Southern South America and their relationship with surface temperature". *Climate Research*. núm, 16, 1–15.
- Salmi T., A. Mata, P. Anttila, T. Ruoho-Airola and T. Amnell. (2002). *Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall Test and Sen's slope estimates -the Excel template application MAKESENS*. Ilmatieteen laitoks Meteorologiska Institutet. Finnish Meteorological Institute Painopaikka: Edita Oyj. Helsinki, Finland. Retrieved from http://cdn.fmi.fi/legacy-fmi-fi-content/documents/MAKESENS_MANUAL.pdf
- Sanz Donaire, J. J. (2006) «Indicadores pluviométricos de sequía para España (1865-2004)». *Observatorio medioambiental*, núm. 9, 187-213
- Scarpati, O. E., L. B. Spescha y A. D. Capriolo. (2002). «Occurrence of the severe floods in the Salado River River basin, Buenos Aires province, Argentina». J. A. A. Jones y Ming-Ko Woo (eds.), *Mitigation and Adaptation. Strategies for Global Change*, Kluwer Academic Publishers, Vol. 7, núm. 3, 285-301.
- Scarpati, O. E., J. A. Forte Lay, L. B. Spescha y A. D. Capriolo. (2007). «Autumn soil water surplus during ENSO events in argentine pampean flatlands». En Robinson, P. J., M-K. Woo y J. A. A. Jones (eds.), *Managing water resources in a changing physical and social environment*, IGU, Home of Geography Publication Series, Societa Geografica Italiana Rome, Part 2, Chapter 4, pp. 27-36.
- Scarpati, O. E., J. A. Forte Lay and A. D. Capriolo. (2010). «Drought risk in argentine pampean region». 2011. *International Journal of Ecology and Development*. *IJED*. núm. 18, W.11: 1- 18.
- Scarpati, O., Forte Lay, J and A. Capriolo. (2011). «Drought risk in argentine pampean region». *International Journal of Ecology and Development*. *IJED*. Volume 18, núm. W11: 1- 18. (Online).
- Scarpati, O. E. y A. D. Capriolo. (2013). «Sequías e inundaciones en la provincia de Buenos Aires (Argentina) y su distribución espacio-temporal». *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, UNAM. núm. 82, 38-51.

- Scian, B. y M. Donnari. (1997). «Retrospective analysis of the Palmer Drought Severity Index in the semi-arid Pampas Region, Argentina». *International Journal of Climatology*, Vol. 17, 313–322
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable (SAYDS) (2015) Proyecto «Aumentando la Resiliencia Climática y Mejorando el Manejo Sostenible de la Tierra en el Sudoeste de la Provincia de Buenos Aires». Disponible en: (<http://www.ambiente.gov.ar/>) [15/02/2015]
- Spescha, L., J. A. Forte Lay, O. E. Scarpati y R. Hurtado. (2004). «Los excesos de agua edáfica y su relación con el ENSO en la Región Pampeana». *Revista de la Facultad de Agronomía*, núm. 24(2), 161-167.
- Tang Ch., and Piechota, T. C. (2009). «Spatial and temporal soil moisture and drought variability in the Upper Colorado River Basin». *Journal of Hydrology*, núm. 379, 122-135.
- Thornthwaite, C.W. y J.R. Mather. (1955). *The water balance*. Publications in Climatology. Vol. III, Number 1. Cantarton, New Jersey, USA.
- Valiente, O. M. (2001). «Sequías: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación». *Investigaciones Geográficas*. núm. 26, 59-80. Instituto Universitario de Geografía. Universidad de Alicante.
- Viglizzo, E. F. (1994). «El INTA frente al desafío del desarrollo agropecuario sustentable». En: *Desarrollo agropecuario sustentable*. INTA-INDEC. 85 pp.
- Viglizzo, E., Frank, F.C., Carreño, L.V., Jobbagy, E.G., Pereyra, H., Clatt, J., Pincen, D. y Ricard, M.F. (2011). «Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina». *Global Change Biology*, núm. 17, 959–973
- Wilhelmi, Olga V. and Donald A. Wilhite (2002). «Assessing vulnerability to agricultural drought: a Nebraska case study». *Natural Hazards* 25, pp. 37–58. Kluwer Academic Publishers
- Wilhite, D. A. y M. H. Glantz. (1985). «Understanding the drought phenomenon: the role of definitions». *Water Int.*, núm. 10, 111-120.

Sobre los autores

OLGA EUGENIA SCARPATI

Miembro de la Carrera de Investigador del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas Profesor Titular de Geografía Física I de la Carrera de Geografía en la Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación (FaHCE). Universidad Nacional de La Plata (UNLP) Miembro Honorario de la Comisión para la Sustentabilidad del Agua de la Unión Geográfica Internacional. Autor de trabajos en revistas publicados revistas internacionales como *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, *GeoJournal*, *Geofísica Internacional*, *Mundo Agrario*, *Water*, *Estudios Geográficos*, etc. Editora del libro *Environmental change and rational water use* (IGU-CONICET)

ALBERTO DANIEL CAPRIOLO

Miembro Profesional de la Carrera de Personal de Apoyo a la Investigación del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Miembro de la Comisión para la Sustentabilidad del Agua de la Unión Geográfica Internacional Autor de trabajos publicados en revistas internacionales como *International Water Journal*, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, *Journal of Flood Engineering*, *International Journal of Ecology and Development*, *Water, Energy and Environment Research*, *International Scholarly Research Network*. *ISRN Meteorology*, *Geofísica Internacional*, *Mundo Agrario*, etc.